RELATIONS ENTRE LES CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES ET MICROBIOLOGIQUES DE QUELQUES SOLS CULTIVES

R. CHAUSSOD [1], B. NICOLARDOT [1], G. CATROUX [1] et J. CHRETIEN [2]

RESUME

Dans quatorze échantillons de sols différents, appartenant à divers types pédologiques, le niveau de la biomasse microbienne et quelques-unes de ses activités liées aux cycles du carbone et de l'azote ont été déterminés.

Ces critères biologiques ont été confrontés aux caractéristiques physico-chimiques des sols par des méthodes statistiques : l'analyse en composantes principales a montré que les échantillons étudiés pouvaient être classés en cinq groupes et que les critères biologiques étaient fortement liés aux types pédologiques. La régression progressive (régression linéaire multiple) a permis de préciser et tenter de quantifier les relations entre les caractéristiques physico-chimiques des échantillons des sols et leurs propriétés microbiologiques.

La respiration spécifique (flux de C-CO_2 par unité de C-biomasse) apparaît être une caractérisation simple mais très intéressante de la biomasse d'un échantillon de sol. Elle montre le lien entre l'intensité des phénomènes de minéralisation-réorganisation de l'azote, les paramètres énergétiques de la microflore, et les caractéristiques du sol au sein desquelles prédomine la teneur en argile.

INTRODUCTION

La caractérisation des principaux types pédologiques s'appuie largement sur des données physico-chimiques obtenues par l'intermédiaire de méthodes standard. Les aspects biologiques sont aussi pris en compte par le pédologue lors de son observation, mais de façon implicite et qualitative car ils ne donnent généralement lieu à aucune *détermination.* En effet, la caractérisation biologique des sols par des mesures réellement quantitatives est des plus délicates.

Pour des raisons agronomiques évidentes, de très nombreux travaux ont été consacrés à la minéralisation de l'azote dans différents types de sols (DROUINEAU et LEFEVRE, 1949, CRASWELL et WARING, 1972 ; VERSTRAETE et VOETS, 1976 ; MARY et REMY, 1979). Moins nombreuses mais tout aussi intéressantes sont les études sur la minéralisation du carbone. Ainsi DOMMERGUES (1960) proposa-t-il la notion de coefficient de minéralisation du carbone en conditions standard comme pouvant être utilisée dans la caractérisation de types pédologiques. Poursuivant dans cette direction, BAUZON et coll. (1968) ont utilisé simultanément des critères biologiques (respirométriques et enzymatiques) et physico-chimiques (pH), une analyse statistique de type multivariable permettant alors de classer les sols forestiers en fonction de la biodégradabilité de leur matière organique.

(1) Laboratoire de microbiologie des sols - I.N.R.A. - BV 1540 - 21034 DIJON Cédex.
(2) Station de Science du Sol - I.N.R.A. - BV 1540 - 21034 DIJON Cédex.

L'émergence d'outils méthodologiques parfaitement adaptés à la détermination *quantitative* de la biomasse microbienne (JENKINSON, 1966 ; JENKINSON et POWLSON, 1976) rend possible l'étude des relations entre cette grandeur et les caractéristiques physico-chimiques d'échantillons de sols. En outre, il est intéressant de rechercher des paramètres biologiques associés qui soient discriminants pour caractériser les différents types de sols.

C'est ce que nous avons tenté de faire dans le présent travail où nous avons déterminé sur quatorze échantillons de sols cultivés, définis par des critères pédochimiques, la biomasse microbienne ainsi que les activités de minéralisation du carbone et de minéralisation-réorganisation de l'azote. L'analyse statistique de type multivariable (BACHACOU et coll., 1981 ; DAGNELIE, 1973) a été utilisée pour rechercher les principales liaisons entre les données physico-chimiques et les données biologiques.

I. MATERIEL ET METHODES

A) Les sols

Les études d'ordre biologique ne peuvent être réalisées en toute rigueur que sur des sols en place ou à défaut fraîchement prélevés et surtout n'ayant pas subi les phases de séchage et de stockage prolongé habituellement appliquées en vue des seules analyses physico-chimiques (CHAUSSOD et Coll., 1986). Aussi avons-nous limité notre étude à une gamme de sols cultivés représentant des types pédologiques aussi variés que possible mais se trouvant à moins de 100 km de notre laboratoire. Il s'agit dans tous les cas de sols labourés, c'est-à-dire excluant les sols sous prairie et les sols sous forêt.

Les sols ont été sélectionnés d'après les cartes pédologiques élaborées par CHRETIEN (1976, 1986a), un profil type étant décrit et caractérisé sur le plan physico-chimique pour chacun des sols retenus. Ils sont décrits ci-dessous selon la classification française des sols, qui les répartit dans trois classes différentes. La nomenclature indiquée entre parenthèses en anglais fait référence à la classification F.A.O.

CLASSE I : SOLS PEU EVOLUES

Sol 1 : Saint-Seine-en-Bâche. Sol alluvial sablo-argileux de la vallée de la Saône (Sand - clay material).

Sol 2 : Veuvey-sur-Ouche. Sol alluvial argileux de la vallée de l'Ouche (Luvisoil on clay).

Sol 3 : Bressey-sur-Tille. Sol alluvial humifère calcaire à hydromorphie de nappe, sur graviers de la Tille (Rendzina).

CLASSE V : SOLS CALCIMAGNESIQUES

Sol 4 : Dijon. Sol brun calcaire sur marne oligocène (Eutric calcaric cambisoil).

Sol 5 : Chaux. Sol brun calcique superficiel sur calcaire dur jurassique (Rendzina on limestone).

Sol 6 : Pluvet. Sol brun calcique épais (Eutric calcaric cambisoil).

Sol 7 : Villers-la-Faye. Sol brun calcique profond sur marne (Eutric calcaric cambisoil on marl).

CLASSE VII : SOLS BRUNIFIES

Sol 8 : Auxonne. Sol sableux à hydromorphie de nappe des basses terrasses de la Saône. (Cambic arenosoil on fluvial terraces).

Sol 9 : Rouvres-Meilly. Sol brun sur limon profond de l'Auxois (Eutric calcaric cambisoil).

Sol 10 : Saulieu. Sol brun acide sableux sur arène granitique du Morvan (Cambic arenosoil on granitic arena).

Sols 11 et 12 : Island. Sols bruns acides sableux sur arène granitique du Morvan (Cambic arenosoil on granitic arena).

Sol 13 : Champdôtre. Sol brun lessivé limono-argileux des basses terrasses de la Saône (Luvisoil).

Sol 14 : Soirans. Sol lessivé hydromorphe sur limons de Bresse (Gleyic luvisoil).

Aussitôt après le prélèvement dans l'horizon Ap (0-20 cm), les échantillons de sols ont été tamisés (maille carrée de 5 mm) puis stockés quelques jours à 8° C pour revenir à un état d'équilibre biologique avant les mesures de biomasse microbienne et d'activités. La plupart des analyses physico-chimiques, dont les résultats figurent dans le tableau I ont été effectuées par le laboratoire d'Analyse des Sols de l'INRA (Arras) après séchage à l'air. Les teneurs en « calcaire actif » ont été déterminées selon la méthode de DROUINEAU (1942).

Tableau I : Caractéristiques analytiques des échantillons de sols.
Analytical characteristics of the studied soil samples.

Variables / Individus	1 Argile %	2 Sables/Limons	3 $CaCO_3$ actif	4 pH eau	5 C Org ‰	6 N kjeldahl ‰	7 C.E.C. mEq/100	8 H.E. à pF 3 %	9 Ca/CEC
1 St-Seine en B.	16	1,21	0	7,3	14,2	1,49	13,2	19	0,94
2 Veuvey s/O	45	0,25	0,8	7,7	38,4	4,80	23,2	35	1,06
3 Bressey s/T	41	0,25	12,7	7,9	47,3	5,70	30	37	1,75
4 Dijon	26	0,20	0,9	7,4	11,5	1,38	20,8	25	1,04
5 Chaux	52	0,17	0,6	7,5	21,7	2,49	23,6	27	1,30
6 Pluvet	31	0,13	0,6	7,9	10,5	1,31	15	23	1,31
7 Villers la F.	43	0,43	0,7	7,3	18,2	2,21	21,3	27	1,54
8 Auxonne	10	7,18	0	7,3	9,1	0,84	8,3	10	1,01
9 Rouvres M.	38	0,35	0	6,5	17,1	2,31	22,2	28	1,03
10 Saulieu	15	6,08	0	5,3	15,6	1,63	8,6	14	0,44
11 Island I	15	3,72	0	5,0	18,2	1,81	10,5	17	0,45
12 Island II	15	3,72	0	5,2	16,6	1,70	11,4	19	0,24
13 Champdôtre	24	0,31	0,5	7,8	11,5	1,42	14,2	22	1,49
14 Soirans	14	0,56	0	7,9	9,9	0,91	8,4	18	1,89

B) Mesures biologiques

Les mesures de biomasse microbienne et de respiration ainsi que les mesures de minéralisation d'azote ont été réalisées en mars 1983 ; celles concernant la minéralisation de paille de maïs et la réorganisation d'azote l'ont été lors du prélèvement d'octobre 1982. Les échantillons de sols n'ont pas subi de séchage avant utilisation.

Toutes les mesures biologiques sont basées sur des incubations à température constante (28 + 0,5° C) et à une humidité proche de l'optimum pour l'activité biologique des échantillons (NICOLARDOT, 1983). Ces incubations ont mis en œuvre des échantillons correspondant à 40 g de sol sec, avec quatre répétitions par traitement.

1. Respiration des échantillons de sol

Le CO_2 dégagé par les échantillons de sol non traités a été piégé dans de la soude puis dosé, après sept, quatorze et vingt-huit jours d'incubation, par colorimétrie en flux continu comme décrit par CHAUSSOD et coll. (1986).

2. **Biomasse microbienne**

La quantité de carbone microbien a été déterminée par la méthode de fumigation au chloroforme décrite par JENKINSON et POWLSON (19786) avec les modifications proposées par CHAUSSOD et NICOLARDOT (1982). Après fumigation, les échantillons sont réincubés à 28° C, le dosage du CO_2 dégagé entre zéro et sept jours et entre sept et quatorze jours permettant d'apprécier le « flush » de décomposition des corps microbiens (Flush = C-CO_2 (0-7 j) — C-CO_2 (7-14 j)).

Le coefficient K_C de proportionnalité entre le carbone microbien total et le carbone microbien minéralisé sous forme de CO_2 lors du « flush » a été déterminé sur les mêmes échantillons recevant une quantité connue de corps microbiens uniformément marqués au ^{14}C, le ^{14}C-CO_2 piégé dans la soude étant dosé par scintillation liquide (NICOLARDOT et coll., 1984). Ce coefficient K_C permet d'accéder au carbone microbien par la formule :

$$\text{C-Biomasse} = \frac{\text{« Flush »}}{K_C}$$

3. **Minéralisation d'azote**

La minéralisation nette d'azote a été déterminée lors d'une incubation de vingt-huit jours à 28° C, méthode dérivée de celle décrite par DROUINEAU et LEFEVRE (1949). Après extraction par KC1 N, les formes minérales de l'azote ont été dosées par colorimétrie en flux continu, en utilisant la méthode de Berthelot pour l'ammonium et la méthode de Griess Ilosvay pour les nitrites, les nitrates étant réduits en nitrites par passages sur une colonne de cadmium cuivré.

4. **Minéralisation du carbone et réorganisation d'azote après apport de paille**

L'aptitude des échantillons de sols à minéraliser le carbone apporté par de la paille de maïs (2 000 mgC/kg sol, C/N = 66,5) et à immobiliser l'azote minéral apporté simultanément (200 mg N-NO_3/kg sol) a été évaluée après adjonction de 10 mg P-PO_4 afin que cet élément ne limite pas l'activité biologique.

Le C-CO_2 dégagé a été mesuré après sept, quatorze et vingt-huit jours ; l'azote minéral a été dosé en début d'expérience et après vingt-huit jours d'incubation.

C) **Calculs et analyses statistiques**

Tous les résultats sont exprimés en mg de carbone ou d'azote par kg de sol sec.

Les relations entre les diverses caractéristiques des échantillons de sols ont été recherchées d'une part en faisant appel à l'analyse en composantes principales, d'autre part grâce à des méthodes de régression progressive avec ou sans contrainte.

L'analyse en composantes principales a été effectuée sur la matrice de corrélation des variables physico-chimiques et biologiques, sans transformation de variables.

La régression progressive est une régression linéaire multiple (pas-à-pas) qui essaie de rendre compte de la plus grande part de la variance globale des variables à expliquer (ici certaines propriétés biologiques) en introduisant successivement dans le modèle les variables explicatives (par exemple des caractéristiques physico-chimiques des sols) qui ont le coefficient de corrélation partiel le plus important (TOMASSONE et coll., 1983). La signification de la liaison a été évaluée à l'aide du coefficient de corrélation multiple R^2 et du test F de Fisher-Snedecor (DAGNELIE, 1973).

Dans tous les cas, les calculs statistiques ont été effectués à l'aide d'un ordinateur « mini 6 » (CII-H.B.) en utilisant les programmes de la bibliothèque statistique de l'I.N.R.A. « Amance 81 » (BACHACOU et coll., 1981).

II. RESULTATS

A) Biomasse microbienne et minéralisation du carbone et de l'azote

Les résultats de ces déterminations sont portés dans le tableau II. La biomasse microbiene (colonne 12) est obtenue à partir des colonnes 10 et 11. Elle varie de 141 à 1 219 mg C. kg^{-1} selon les échantillons de sols. La respiration en conditions standard, appelée ici *respiration-témoin* car mesurée sur les échantillons non traités, se situe entre 6,7 et 18 mg C. kg^{-1} . j.$^{-1}$ (colonne 14). Elle représente le flux de carbone qui sort des échantillons de sols dans nos conditions expérimentales. Cette respiration, rapportée à la biomasse, donne la *respiration spécifique* (colonne 6) ou flux de C-CO_2 par unité de C-biomasse. La respiration spécifique varie de 14.10^{-3} à 53.10^{-3} mg C-CO mg C-biomasse $^{-1}$.j^{-1}.

Tableau II : Caractéristiques biologiques des échantillons de sols : biomasse microbienne et minéralisation du carbone et de l'azote.

Biological characteristics ot the sudied soils amples : microbial biomass and carbon and nitrogen mineralization.

Variables / Individus	10 Flush C mgC.kg^{-1}	11 K_c	12 Biomasse C mgC.kg^{-1}	13 Biomasse C % C_t	14 Respiration mgC.kg^{-1}.j^{-1}	15 Respiration % C_t	16 Respiration spécifique 10^{-3}.j^{-1}	17 Azote minéralisable en 28 jours à 28°C mgN.kg^{-1}	18 Azote minéralisable en 28 jours à 28°C % N_t
1	113,4	0,48	236	16,6	9,6	0,68	41	18,3	12,3
2	511,9	0,42	1219	32	18	0,47	15	30,3	6,3
3	311,6	0,39	799	16,0	15	0,32	19	27,1	4,8
4	153,1	0,41	373	32,4	6,8	0,59	18	8,8	6,4
5	269,3	0,39	691	31,8	9,8	0,45	14	12,4	5,0
6	119,6	0,47	254	24,2'	6,7	0,64	26	12,3	9,4
7	246	0,42	586	32,2	10	0,55	17	10,4	4,7
8	59,1	0,42	141	15,5	7,5	0,82	53	11,4	13,6
9	202,5	0,42	482	28,2	9,6	0,56	20	8,7	3,8
10	93,8	0,36	261	16,7	10	0,64	38	17,6	10,8
11	141,9	0,42	338	18,6	13,1	0,72	39	26,3	14,5
12	147,4	0,35	421	25,4	12,8	0,77	30	31,7	18
13	124,4	0,46	270	22,9	7,1	0,60	26	12,8	9,0
14	123,7	0,47	263	26,6	11,5	1,16	44	11,3	12,4

En exprimant l'ensemble de ces valeurs en pourcentage du carbone total (colonnes 13 et 15), il apparaît clairement que les sols légers à biomasse faible en valeur absolue, sont ceux où la proportion de carbone dans le compartiment vivant de la matière organique est aussi la plus faible : 1 à 2 %, à l'exception de l'échantillon 14 (limoneux). Dans les sols lourds, le carbone microbien représente 3 à 4 % du carbone total, l'échantillon 3 (humifère calcaire) faisant exception. Par contre, les échantillons de sols sableux ou limoneux présentent les dégagements de C-CO_2 les plus élevés en valeur relative, que ce soit par rapport au carbone total ou par rapport à la biomasse (respiration spécifique). Réciproquement, les échantillons de sols argileux hébergent une biomasse microbienne importante mais d'activité respiratoire proportionnellement plus réduite (figure 1).

Respiration Spécifique
60
50
40
30
20
10
10 20 30 40 50 % Argile
8
14
1
11
10
12
13
6
9
4
3
7
2
5

Figure 1 : Respiration spécifique de la biomasse microbienne en mg C-CO_2. mg C-biomasse^{-1}. j^{-1} $\times$ 10^{-3}, en fonction de la teneur en argile des échantillons
Specific respiration of the microbial biomass versus clay content of soil samples.

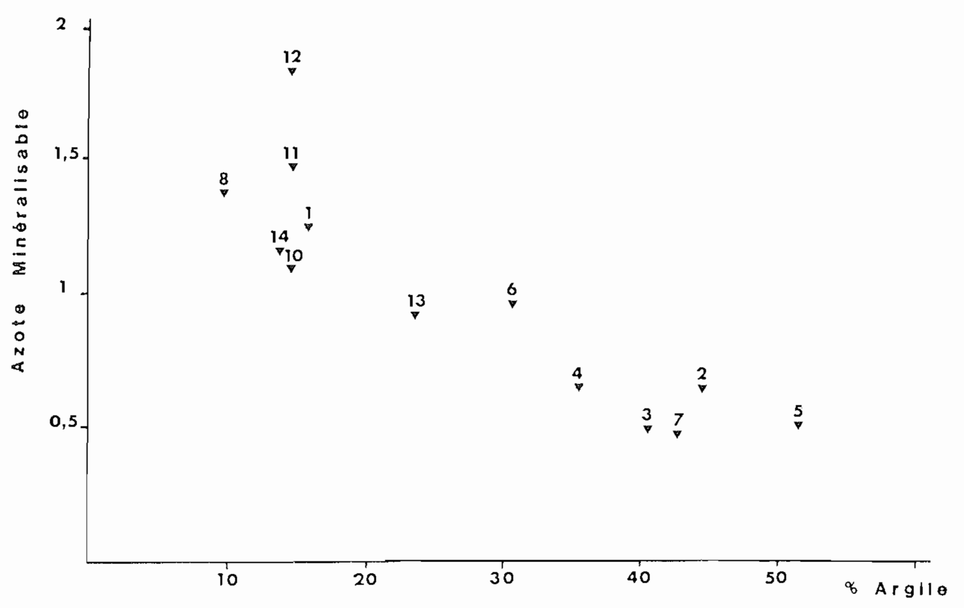


Figure 2 : Azote minéralisable : Taux de minéralisation (azote minéralisée en 28 jours à 28°C, exprimée en % du N total) en fonction de la teneur en argile des échantillons de sols.
Mineralizable nitrogen (as % total N) versus clay content of soil samples.

Des constatations identiques peuvent être tirées des quantités d'azote minéralisées en vingt huit jours à 28° C. Les échantillons contenant moins de 20 % d'argile minéralisent plus de 1 % de leur stock d'azote total durant l'incubation, cette proportion n'étant que de 0,4 à 0,9 % pour les échantillons à plus de 30 % d'argile (figure 2). Le facteur le plus étroitement associé à la minéralisation de l'azote est la respiration du témoin (minéralisation du carbone). Enfin, il convient de préciser que pour tous les échantillons de sols étudiés l'azote minéral se trouve entièrement sous forme nitrique à la fin des vingt-huit jours d'incubation.

B) Minéralisation du carbone végétal et organisation d'azote minéral

La minéralisation du carbone et l'évolution du niveau d'azote minéral après apport de paille de maïs ont été enregistrées également sur une période de vingt-huit jours. Ces résultats portés dans le tableau III ont été calculés en formulant l'hypothèse qu'il n'y avait pas « d'effet d'activation » de la matière organique apportée sur l'évolution du carbone et de l'azote des échantillons de sols, c'est-à-dire par simple différence entre le traitement avec paille et un témoin sans paille.

	N minéral mg $N.kg^{-1}$	$C-CO_2$ mg $C.kg^{-1}$	$C-CO_2$ % C apporté	C minéralisé / N immobilisé
1	- 38,7	612	30,6	15,8
2	- 54,5	650	32,5	11,9
3	- 61,2	699	34,9	11,4
4	- 52,2	706	35,3	13,5
5	- 48,1	568	28,4	11,8
6	- 51,3	800	40,0	15,6
7	- 45,4	674	33,7	14,8
8	- 31,8	618	30,9	19,4
9	- 51,9	651	32,5	12,5
10	- 41,8	602	30,1	14,4
11	ND	ND	ND	ND
12	ND	ND	ND	ND
13	- 63,2	698	34,9	11,0
14	- 49,3	697	34,9	14,1

Tableau III : Minéralisation du carbone et variation du stock d'azote minéral après apport de paille de maïs. ND : non déterminé.

Carbon mineralization and variation of the amount of mineral nitrogen after maïze straw addition. ND : not determined.

Le supplément de carbone minéralisé dans l'essai représente de 28 à 40 % du carbone végétal apporté (les trois quarts des valeurs étant comprises entre 30 et 35 %), entraînant une diminution du stock d'azote minéral de 32 à 63 mg N. kg^{-1}, sans qu'une relation évidente apparaisse entre ces chiffres et l'une ou l'autre des caractéristiques des échantillons de sols.

Le rapport supplément de carbone minéralisé-azote immobilisé à vingt-huit jours varie entre 11 et 19, avec une tendance à être plus élevé dans les échantillons de sols légers à biomasse faible et à respiration spécifique importante. Mais, il ne s'agit là que d'une constatation : ce simple test ne permet pas de quantifier les vitesses et rendements d'assimilation en fonction du type de sol et devra être repris sous forme cinétique (on peut imaginer, entre autres hypothèses, une reminéralisation plus précoce de l'azote immobilisé dans les échantillons de sols légers).

C) Relations entre les critères biologiques et les caractéristiques physico-chimiques des sols

Le tableau 4 donne la matrice des corrélations entre les variables 1 à 18.

Tableau 4 : Matrice des corrélations.
Table 4 : Correlation matrix.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1 Argile	1000																	
2 Sables/Limons	-697	1000																
3 Ca CO_3	337	-240	1000															
4 pH	432	-630	309	1000														
5 Carbone	551	-290	772	171	1000													
6 Azote	620	-350	753	216	992	1000												
7 C.E.C.	917	-668	621	419	730	786	1000											
8 H.E. pF3	867	-759	596	441	788	845	942	1000										
9 Ca/C.E.C.	544	-658	359	884	399	446	512	612	1000									
10 Flush	753	-488	360	295	821	855	748	850	567	1000								
11 K_C	-127	-420	-205	654	-340	-306	-107	-69	461	-180	1000							
12 Biomasse	753	-441	397	228	848	876	759	845	508	993	-285	1000						
13 Biom. % Ct	684	-622	-253	240	27	100	462	499	384	505	-34	488	1000					
14 Resp. Témoin	196	-75	382	-118	795	758	310	485	214	740	-316	756	51	1000				
15 Resp. T. % Ct	-756	343	-518	-134	-668	-710	-823	-726	-162	-596	326	-622	-164	-199	1000			
16 Resp. Spécif.	-928	719	-300	-249	-511	-584	-868	-867	-381	-703	225	-714	-718	-201	761	1000		
17 N minéralisable	-100	172	329	-360	623	565	64	220	-190	433	-411	473	-239	818	-190	-28	1000	
18 N min. % N_t	-885	643	-364	-502	-437	-518	-845	-766	-601	-571	-34	-553	-508	-5	-691	775	370	1000

Les liaisons entre les caractéristiques analytiques des échantillons de sols et leurs caractéristiques microbiollogiques peuvent être analysées plus finement, bien que de façon uniquement *qualitative*, par l'analyse en composantes principales. Mais pour cela, le nombre de variables ne doit pas dépasser le nombre d'observations. Disposant ici des observations sur quatorze individus, nous avons retenu douze variables. A partir des tableaux I et II, nous avons choisi six variables d'ordre physico-chimique et six variables d'ordre biologique. Ce sont, respectivement :

— La teneur en argile, qui détermine de nombreuses aptitudes liées aux propriétés de surface de ces minéraux (mais ces argiles « granulométriques » n'ont pas été caractérisées au plan minéralogique) ; et le rapport sables-limons qui caractérise le « squelette » du sol, déterminant le type de porosité — micro, méso ou macro porosité (J. CHRETIEN, 1986b) avec ses incidences sur l'aération, etc. ;

— Les taux de carbone « Anne » et d'azote « Kjeldahl », pour quantifier le niveau de matière organique ;

— Le pH et la tenueur en calcaire « actif », ce dernier paramètre ayant été choisi de préférence au calcaire total (mais nous avons observé que les résultats sont tout à fait comparables, que l'on prenne l'un ou l'autre) ;

— Le « flush », ou quantité de carbone facilement minéralisable après fumigation ; le coefficient K_C ou proportion de carbone microbien minéralisé en sept jours à 28° C ;

— La biomasse, exprimée en proportion du carbone total ;

— La respiration du témoin et la respiration spécifique ;

— L'azote minéralisable.

La projection sur les trois axes principaux, du nuage des individus dans l'espace des variables est représentée par la figure 3. Ces trois premiers axes prennent en compte plus de 86 % de l'inertie totale. L'analyse dans l'espace des individus montre que l'axe 1 est formé principalement de composantes des variables argile, carbone, azote, « flush », et respiration spécifique. Les variables sables-limons, pH, respiration témoin et N minéralisable contribuent le plus à l'axe 2, alors que l'axe 3 est formé surtout des composantes des variables pH, calcaire, K_C et proportion de carbone total sous forme de biomasse.

La figure 3 permet surtout de rassembler nos quatorze échantillons de sols en cinq groupes et autorise dans une certaine mesure de connaître les caractéristiques qui peuvent les réunir.

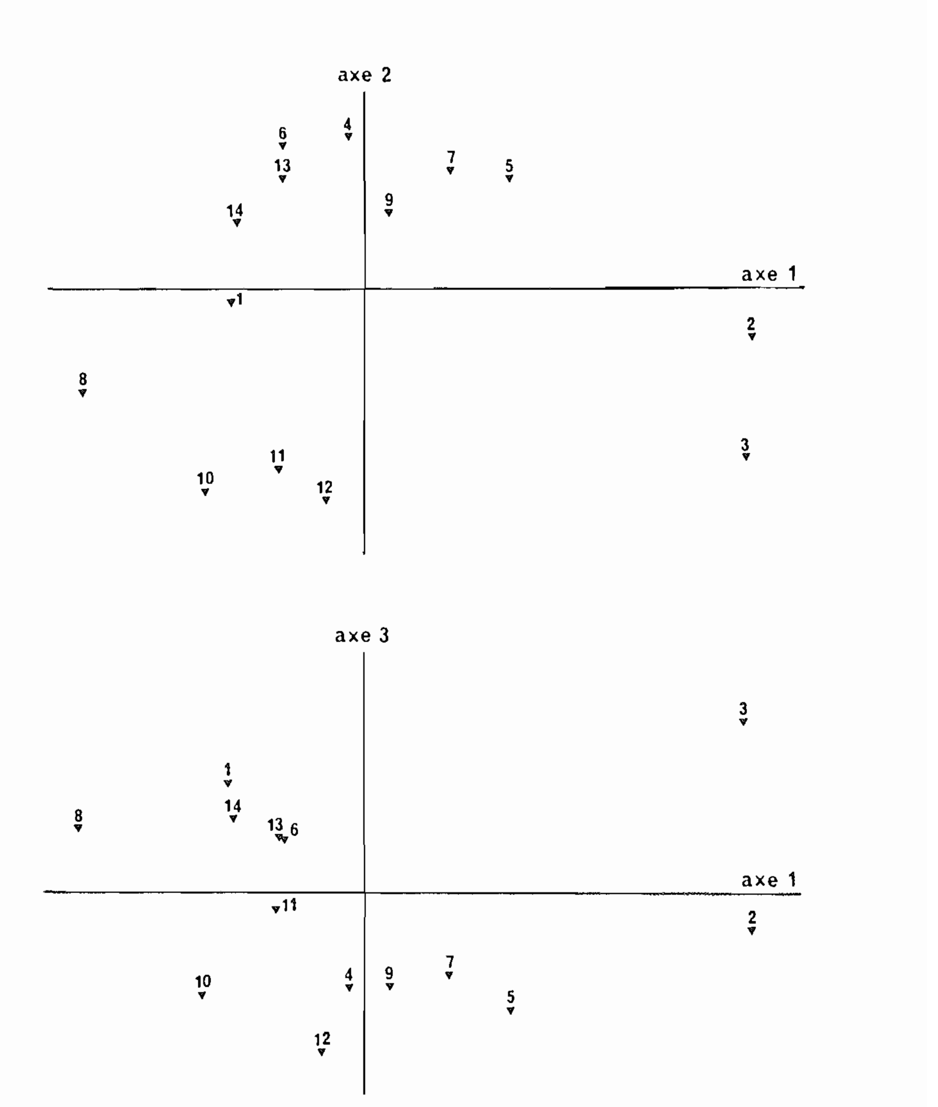


Figure 3 : Analyse en Composantes Principales. Projection, sur les trois premiers axes, du nuage des individus dans l'espace des variables.

Principal Components Analysis.

Un premier groupe est formé des échantillons 2 et 3, riches en argile et surtout en matière organique et possédant les biomasses microbiennes les plus élevées en valeur absolue. Les excès d'eau temporaires constatés pour ces deux sols peuvent expliquer certaines de leurs caractéristiques qui les unissent.

Le deuxième groupe (échantillons limono-argileux 4, 5, 7 et 9) et le troisième groupe (échantillons limoneux à sableux 1, 6, 13 et 14) sont assez proches mais se distinguent nettement par le fait que les échantillons du groupe 2 sont plus riches en argile, matière organique et biomasse microbienne et possèdent une respiration spécifique plus basse que ceux du groupe 3.

L'échantillon 8, franchement sableux, à biomasse faible et à respiration spécifique très élevée, se distingue suffisamment des groupes 3 et 5 dont il est intermédiaire pour qu'il soit classé à part.

Le cinquième et dernier groupe est formé des échantillons 10, 11 et 12. Il s'agit d'échantillons de sols sableux acides.

Il est intéressant de noter qu'une analyse en composantes principales effectuée uniquement sur les caractéristiques physico-chimiques et une autre effectuée sur les déterminations biologiques (résultats non présentés ici) conduisent à regrouper entre eux les mêmes échantillons. Autrement dit, ces échantillons de sols sont caractérisés aussi bien par des critères biologiques que par des analyses physico-chimiques, et ces deux types de déterminations sont cohérentes entre elles.

On peut donc tenter de *quantifier* les relations qui unissent les critères biologiques aux caractéristiques physico-chimiques. C'est ce qui a été réalisé par des méthodes de régression linéaire multiple (régression progressive), avec les résultats suivants :

BIOMASSE MICROBIENNE

exprimée en valeur absolue (mg C/kg sol)

$$B = 235\ (\%\ N) - 47\ (\%\ CaCO_3) + 4{,}65\ (\%\ Argile) - 127$$
$$F\ (3{,}10) = 75{,}1^{**} \quad R^2 = 0{,}98$$

BIOMASSE MICROBIENNE

exprimée en % du carbone total

$$B = 0{,}4\ (\%\ argile) - 1{,}6\ (\%\ CaCO_3) + 14{,}4$$
$$F\ (2{,}11) = 14{,}9^{**} \quad R^2 = 0{,}86$$

RESPIRATION

du témoin en mg $C\text{-}CO_2$/kg sol/jour

$$R = 0{,}47\ (\%\ C) - 0{,}25\ (C.E.C.) - 0{,}49\ (\%\ CaCO_3) + 6{,}53$$
$$F\ (3{,}10) = 26{,}1^{**} \quad R^2 = 0{,}94$$

RESPIRATION SPECIFIQUE

en mg $C\text{-}CO_2$/mg C-Biomasse/jour

$$R.S. = -0{,}81\ (\%\ Argile) + 51{,}5$$
$$F\ (1{,}12) = 74^{**} \quad R^2 = 0{,}93$$

La relation entre la respiration spécifique et la teneur en argile apparaîtrait encore plus étroite si l'on envisageait une relation non linéaire comme le suggère la figure 1. A noter aussi que le pH et le rapport sables-limons apparaissent dans la régression progressive comme les deux variables explicatives les plus importantes après la teneur en argile.

AZOTE MINERALISABLE

en mg N/kg sol

$$N = 0{,}93\ (\%\ carbone) - 1\ (C.E.C.) + 16{,}3$$
$$F\ (2{,}11) = 13{,}9^{**} \quad R^2 = 0{,}85$$

Si l'on inclut, en plus des variables physico-chimique, des variables biologiques comme facteurs explicatifs, c'est l'une de ces dernières qui devient prépondérante :

$$N = 2{,}05 \text{ (Respi. Témoin)} - 4{,}54$$
$$F\ (1{,}12) = 24.3^{**} \quad R^2\ \% = 0{,}82$$

AZOTE MINERALISABLE

exprimé en % de l'azote total

$$N = 0{,}273 \text{ (\% argile)} + 17{,}1$$
$$F\ (1{,}12) = 43{,}3^{**} \quad R^2 = 0{,}885$$

On constate (figure 2) que la relation entre argile et azote minéralisable exprimé en proportion de l'azote total est exactement du même type que celle observée entre argile et respiration spécifique.

DISCUSSION - CONCLUSION

Si les caractéristiques physico-chimiques des sols sont relativement stables dans le temps, il n'en est pas forcément de même pour les propriétés biologiques, qui peuvent montrer des fluctuations saisonnières (BILLES et coll., 1975). Aussi, afin de s'affranchir au maximum des perturbations liées au gel, à la sécheresse ou à la présence de plante, les principales déterminations de notre étude ont été effectuées après l'hiver et avant la période de végétation active.

Par ailleurs, le nombre restreint d'échantillons de sols étudiés ici et l'absence de certains types pédologiques importants ne nous autorisent pas à tirer des conclusions très générales. Pourtant quelques résultats marquants apparaissent dans cette étude, en premier lieu la cohérence entre la caractérisation physico-chimique des horizons de culture des sols et leurs propriétés biologiques. Les liaisons mises en évidence ici sont souvent suffisamment nettes pour que l'on puisse s'attendre à les retrouver sur d'autres échantillons de sols appartenant aux mêmes types.

Parmi les critères biologiques, le niveau de la biomasse microbienne et la respiration spécifique apparaîssent comme deux critères à la fois très discriminants et très complémentaires.

Nos résultats montrent que la *biomasse microbienne* est étroitement dépendante des teneurs en argile et en matière organique, deux paramètres généralement très liés dans le sol. L'importance des constituants argileux est reconnue depuis fort longtemps (DOMMERGUES et MANGENOT, 1970) aussi bien en ce qui concerne les effets directs sur les micro-organismes (STOTZKI, 1966 ; MARSHALL, 1971 ; SCHMIT et ROBERT, 1984) que les effets de « stabilisation » de la matière organique (CRASWELL and WARING, 1972 ; SORENSEN, 1981 ; BORNAND et coll., 1984). Le rôle du calcium, dont on connaît bien l'action stabilisante vis-à-vis de la matière organique (MULLER et VEDY, 1978 ; GAIFFE et coll., 1984) n'a pu être précisé ici faute d'un échantillonnage adéquat.

La respiration spécifique est aussi très liée à la teneur des échantillons de sols en argile, diminuant d'un facteur deux à trois lorsqu'on passe des sols légers aux sols lourds. Les premiers hébergent donc une biomasse plus faible mais proportionnellement plus « active » que celle des sols argileux. Ces observations peuvent être *décrites* en termes de proportions variables selon les échantillons de sols de fractions « actives » et « dormantes » de la biomasse totale (BOTTNER et coll., 1976 ; JENKINSON and LADD, 1981) ou comme une biomasse microbienne considérée comme globalement homogène et possédant des caractéristiques énergétiques sous la dépendance directe ou indirecte du type de sol. Au niveau de *l'interprétation,* on peut invoquer l'effet de protection des matières organiques par les argiles, ce qui en diminuerait la biodisponibilité. On peut aussi invoquer l'effet d'inhibition de l'activité biologique par des pressions partielles en CO_2 élevées au niveau de microsites : la porosité du sol et sa teneur en air et en eau par rapport au volume occupé par les solides seraient des

facteurs déterminants (TESSIER, 1984 ; CHRETIEN, 1986b) dont le rôle devra être abordé expérimentalement.

Plus généralement, si les caractéristiques biologiques des sols ont été souvent reliées aux teneurs en matière organique (ROSS et coll., 1980 ; BECK, 1984 ; SARATH-CHANDRA et coll., 1984), la texture des sols a rarement été prise en compte. Or, elle semble intervenir aussi bien sur l'évolution du carbone (JENKINSON, 1977 ; BOTTNER et coll., 1984) que sur la minéralisation de l'azote (VERSTRAETEN et coll., 1970). Nos résultats montrent clairement une relation inverse entre la teneur en argile et la proportion de l'azote total qui est facilement minéralisable. De même, la corrélation entre l'index appelé azote minéralisable et la respiration globale montre bien que l'on mesure dans les deux cas la biodégradation de la matière organique ; les microorganismes utilisent le carbone pour leur croissance et leurs besoins énergétiques et rejettent dans le milieu l'azote excédentaire.

Il existe donc un lien évident entre les phénomènes de minéralisation-réorganisation et les caractéristiques énergétiques de la microflore. Les tests simples que nous avons mis en œuvre ici ne représentent qu'une première approche qui devra être affinée en faisant appel à des traceurs isotopiques pour essayer de quantifier les paramètres énergétiques de la biomasse microbienne de différents échantillons de sols et pour rechercher les liens entre type de sol et caractéristiques de la microflore d'une part et évolution de la matière organique ou minéralisation-réorganisation de l'azote d'autre part.

Enfin, l'importance agronomique de la biomasse microbienne comme source et puits d'azote mais aussi comme facteur important dans la réceptivité des sols aux maladies des plantes (ALABOUVETTE et coll., 1984) justifie de rechercher dans quelle mesure les paramètres biologiques sont modifiables par les pratiques culturales, afin de déterminer les influences respectives du type de sol et de son mode de gestion.

Reçu pour publication : octobre 1985
Accepté pour publication : février 1986

REMERCIEMENTS

Ces travaux ont reçu un soutien financier de l'Etablissement Public Régional de Bourgogne.
Nous remercions MM. THOMAS (ENITA - Dijon), CARTERON (INRA - Dijon) et TESSIER (INRA - Versailles), dont les compétences nous ont été bien utiles, ainsi que Mme M.-C. DUMET pour son aide technique.

RELATIONSHIPS BETWEEN PHYSICO-CHEMICAL AND BIOLOGICAL CHARACTERISTICS OF A FEW CULTIVATED SOILS

Soil samples were taken in the Ap horizon (about 0-20 cm) of 14 cultivated soils belonging to various pedological types. The analytical characteristics of these samples were determined (table I) and the level of the microbial biomass and several parameters linked to the carbon and nitrogen cycles were measured (tables II & III). The biological criteria were related to physico-chemical characteristics of the soil samples (table IV) by statistical methods. Principal Components Analysis showed (figure 3) that the soil studied could be classified into 5 groups, and that the biological criteria were strongly linked with the pedological types. Stepwise Regression (linear multiple regression) has allowed both the specification and the quantification of the relationships between the physico-chemical characteristics of soils and their microbiological properties.

In the sandy soil samples, the microbial C-biomass is low in absolute values as in relative values: only 1-2 % of total organic carbon is in this « living » compartment. On the contrary, in heavier soil samples, the microbial biomass is much more important in absolute as in relative value (3-4 % of total organic C) but its specific respiration rate is much more lower than that of the biomass of sandy soil samples.

The amount of nitrogen mineralized during a 28 days incubation at 28° C was also recorded in the same soil samples. More than 1 % of total organic nitrogen was

mineralized in the soils containing less than 20 % clay. And only 0.4-0-9 % of total organic N was mineralized in soils containing more than 30 % clay.

The Specific Respiration (C-CO_2 evolved per unit of C-biomass and per unit of time) appeared to be a simple but very interesting characterization of the soil biomass. It also showed that a relationship exists between the intensity of nitrogen mineralization immobilization processes, the energetics of the microflora, and the soil properties-especially the clay content (figures 1 & 2).

BIBLIOGRAPHIE

ALABOUVETTE C., COUTEAUDIER Y., LOUVET J., 1984. — Recherches sur la résistance des sols aux maladies. XII) Activité respiratoire dans un sol résistant et un sol sensible aux fusarioses vasculaires enrichis en glucose. *Agronomie, 5,* 569-572.

BACHACOU J., MASSON J.P., MILLIER C. C., 1981. — Manuel de la programmathèque statistique AMANÇE 81, Ed. C.N.R.F.-I.N.R.A., 516 p.

BAUZON D., VAN DER DRIESSCHE R., DOMMERGUES Y., 1968. — Caractérisation respirométrique et enzymatique des horizons de surface des sols forestiers, *Science du Sol, 2,* 55-78.

BECK T., 1984. — Mikrobiologische und biochemische Charakterisierung Landwiryschaftlich genutzter Böden. II Mitteilung. Bezichungen zum Humusgehalt. *Z Pflanzener. Bodenk., 147,* 467-475.

BILLES G., CORTEZ J. et LOSSAINT P., 1975. — Etude comparative de l'activité biologique des sols sous peuplements arbustifs et herbacés de la garrigue méditerranéenne. I) Minéralisation du carbone et de l'azote. *Rev. Ecol. Biol. Sol, 12,* 115-139.

BORNAND M., DEJOU J., ROBERT M., ROGER L., 1984. — Composition minéralogique de la phase argileuse des terres noires de Limagne (Puy-de-Dôme). Le problème des liaisons argiles-matière organique. *Agronomie, 4,* 47-62.

BOTTNER P., LOSSAINT P., CORTEZ J., 1976. — Mineralization of labelled microbial compounds after partial sterilization. *In* : Soil Organic matter studies, Symposium I.A.E.A.-F.A.O., Braunschweig, 263-273.

BOTTNER P., MNEIMNE Z., BILLES G., 1984. — Réponse de la biomasse microbienne à l'adjonction au sol de matériel végétal marqué au ^{14}C. Rôle des racines vivantes. *Soil Biol. Biochem., 16,* 305-314.

CHAUSSOD R., NICOLARDOT B., 1982. — Mesure de la biomasse microbienne dans les sols cultivés. I) Approche cinétique et estimation simplifiée du carbone facilement minéralisable. *Rev. Ecol. Biol. Sol,* 19, 501-512.

CHAUSSOD R., NICOLARDOT B., CTAROUX G., 1986. — Mesure en routine de la biomasse microbienne des sols par la méthode de fumigation au chloroforme. *Science du Sol, 2,* 201-211.

CHRETIEN J., 1976. — Carte pédologique de la France. Dijon, notice explicative. INRA Ed., 218 p.

CHRETIEN J., 1986 a. — Carte pédologique de la France. Beaune (en préparation).

CHRETIEN J., 1986 b. — Rôle du squelette dans l'organisation des sols. Conséquences sur les caractéristiques de l'espace poral des sols sur arène et sur terrasse fluviatile. Thèse d'Etat. Dijon. 412 p.

CRASWELL E.T., WARING S.A., 1972. — Effect of grinding on the decomposition of soil organic matter. I. The mineralization of organic nitrogen in relation to soil type. *Soil. Biol. Biochem.,* 4, 435-442.

DAGNELIE P., 1973. — Théorie et méthodes statistiques. Presses Agronomiques de Gembloux, Ed. 3 vol.

DOMMERGUES Y., 1960. — La notion de coefficient de minéralisation du carbone dans les sols. *Agron. Trop.,* 15, 61-72.

DOMMERGUES Y. et MANGENOT F., 1970. — Ecologie microbienne du sol. Masson, Paris. 796 p.

DROUINEAU G., 1942. — Dosage rapide du calcaire actif des sols. Nouvelles données sur la répartition et la nature des fractions calcaires. *Ann. Agron.,* 12, 441-450.

DROUINEAU G., LEFEVRE G., 1949. — Première contribution à l'étude de l'azote minéralisable dans les sols. *Ann. Agon.*, 19, 518-536.

GAIFFE M., DUQUET B., TAVANT H., TAVANT Y., BRUCKERT S., 1984. — Stabilité biologique et comportement physique d'un complexe argilo-humique placé dans différentes conditions de saturation en calcium ou en potassium. *Plant Soil*, 77, 271-284.

JENKINSON D.S., 1966. — Studies on the decomposition of plant material in soil. III) Partial sterilization of soil and the soil biomass. *J. Soil Sci.*, 280-302.

JENKINSON D.S., POWLSON D.S., 1976. — The effect of biocidal treatments on metabolism in soil. V) A method for measuring soil biomass. *Soil Biol. Biochem.*, 8, 209-213.

JENKINSON D.S., 1977. — Studies on the decomposition of plant material in soil. V) The effects of plant cover and soil type on the loss of carbon ^{14}C labelled Ryegrass decomposing under field conditions. *J. Soil Sci.*, 424-434.

JENKINSON D.S., LAND J.N., 1981. — Microbial Biomass in soil : measurement and turnover. *In* : Soil Biochemistry, vol. 5, M. Dekker, 415-471.

MARSHALL K.C., 1971. — Sportive interactions between soil particales and micro-organisms. *In* : Soil Biochemistry, vol. 2, M. Dekker, 409-445.

MARY B., REMY J.C., 1979. — Essai d'appréciation de la capacité de minéralisation de l'azote des sols de grande culture. I) Signification des cinétiques de minéralisation de la matière organique humifiée. *Ann. Agron.*, 30, 513-527.

MULLER J.C. et VEDY J.C., 1978. — Morphoscopie et fractionnement des matières organiques des rendzines sur craie. *Science du Sol*, 2, 129-144.

NICOLARDOT B., 1983. — Influence de l'humidité sur la minéralisation du carbone et de l'azote dans quatre sols cultivés. *Bull. Sci. Bourg.*, 36, 21-28.

NICOLARDOT B., CHAUSSOD R., CATROUX G., 1984. — Décomposition de corps microbiens dans des sols fumigés au chloroforme : effets du type de sol et de microroganisme. *Soil Biol. Biochem.*, 16, 453-458.

ROSS D.J., TATE K.R., CAIRNS A., PANSIER E.A., 1980. — Microbial Biomass estimations in soils from tussock grasslands by three biochemical procedures. *Soil Biol. Chem.*, 12, 375-383.

SARATCHANDRA S.U., PERROTT K.W., UPSDELL M.P., 1984. — Miocrobiological and biochemical characteristics of a range of New Zeland soils under established pasture. *Soil Biol. Biochem.*, 16, 177-183.

SCHMIT J., ROBERT M., 1984. — Action des argiles sur la survie d'une bactérie phytopathogène Pseudomonas solanacearum. *C.R. Acad. Sc. Paris*, 299, 733-738.

SORENSEN L.H., 1981. — Carbon - nitrogen relationships during the humification of cellulose in soils containing different amounts of clay. *Soil Biol. Biochem.*, 13, 313-321.

STOTZKI G., 1966. — Influence of clay minerals on microorganisms. II. Effect of various clay species, homoionic clays and other particles on bacteria. *Can. J. Microbiol.*, 12, 831-848.

TESSIER D., 1984. — Etude expérimentale de l'organisation des matériaux argileux. Thèse d'Etat. INRA éd., 361 p.

TOMASSONE R., LESQUOY E. et MILLIER C., 1983. — La régression, Masson Ed., 180 p.

VERSTRAETE W., VOETS J.P., 1976. — Nitrogen mineralisation tests and potentials in relation to soil management. *Pédologie*, 26, 15-26.

VERSTRAETEN L.M.J., VLASSAK K., LIVENS J., 1970. — Factors affecting the determination of available soil nitrogen by chemichal methods. I) Comparison of extractable with mineralized nitrogen. *Soil Scil.*, 110, 299-305.